

連携記事

日本の甲冑に用いられた鉄鋼材料の金属組織

Microstructure of Steel Materials Used for Japanese Armors

公益財団法人
日本美術刀剣保存協会
主任

釘屋奈都子
Natsuko Kugiyu

東京藝術大学
名誉教授

北田正弘
Masahiro Kitada

1 はじめに

1.1 甲冑の形式

我が国の鉄器の使用は弥生時代に開始したとみられており、半製品や製品などを大陸方面から輸入し、必要に応じて簡単な加工を施して、農具、工具、狩猟道具、武器として使うようになった。その後、古墳時代後期には製鉄が始まったとされ、鉄製品が国内に広まった。古墳時代の遺跡からは短甲や挂甲などの鎧が発掘され、また、鎧をまとった武人の埴輪も出土している。

平安時代から鎌倉時代にかけては、武将には騎射戦用の大鎧、歩卒用には胴を保護する簡単な胴丸や腹巻が使われるようになった。室町時代中期以降は歩兵戦が主流となり、武器は長寸で反りが強い太刀から斬り合い用の短寸で反りの少ない打刀が現れる。また、火縄銃が導入されると、腕から手を防御する籠手（こて）、脚を守る佩楯や脛当などを備えて全身を包む当世具足と呼ばれる鎧が主流になった。歩卒は兜の代わりに鉄板で作られた陣笠を用いた。

江戸時代に入り戦乱が少なくなると、下級武士用の当世具足のほかに、身分の高い武士用に装飾や権威を重視した復古調の大鎧が作られた。明治9年に廃刀令が出される頃には、西洋式の軍隊となって甲冑の製造は衰退した。

1.2 甲冑の構成要素

甲冑は時代によって形式が若干異なるが、基本的には、図1で示すように複数の部品からなっている。甲冑には、三ツ物と呼ばれる主要部品があり、兜、胴および袖鎧である。それぞれが頭部、胴体および肩から腕を守る。甲冑の甲は頭以外の体部を保護する鎧を示し、冑は頭部を保護する兜の意である。三ツ物を補足する小具足には、顔と首を守る面具と喉輪、胴の横を守る脇当、腕を守る籠手、腰から大腿部を守る草摺（くさずり）、佩楯、脛当などがある。このように、日本の甲冑は身体の一部

位に対応する鎧を作り、身体全体を覆うように構成されている。

これらの鎧には、さらに複数の小さい部品が用いられている。胴鎧などは炭素鋼の小片である小札（こざね）を緘（おどし）と呼ばれる糸で結んで、必要な大きさにする。炭素鋼は錆びやすいので、漆を塗って防食する。また、小札を繋ぐために鋼線を用いることで強度が高くなる。鋼線のみを用いた鎖帷子（くさりかたびら）は鋼線の輪を繋げて衣服のように作られる。このほか、革（なめした皮）、布、染料、装飾用の金属などが使われる。中でも防具としての機械的機能は主に炭素鋼が果たし、革も補助的な役割を果たしている。

日本において、近代製鉄が始動するまでの製鉄はたたら製鉄によるものであり、砂鉄を木炭で還元して作った鋼を用いて精錬や加工を行いながら使用していた。本稿で扱う鋼はこのたたら鉄鋼であり、現代鋼とは性質が異なる。

1.3 甲冑の材料科学的研究の経緯

甲冑の研究には大別して美術史および戦闘/形式からの研究と、自然科学的手法を用いた材料研究とがある。前者は各

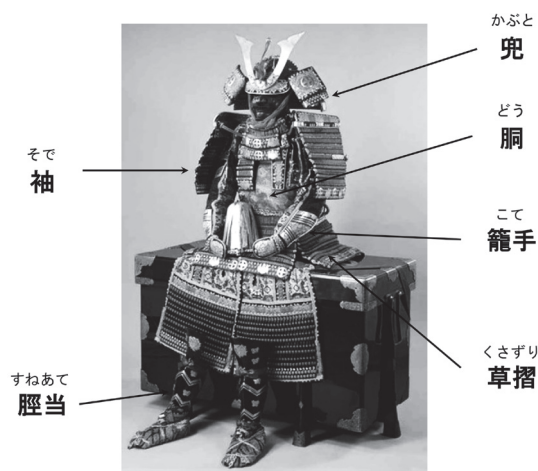


図1 日本の甲冑の例（江戸時代、京都国立博物館蔵）

出典：ColBase (<https://colbase.nich.go.jp/>)

時代の社会的・文化的背景と形式の変遷の解明が主目的であり、後者は材料の組織や機械的性質に関するものである。日本の近代以降の鉄鋼文化財の材料学的研究の先駆けとして明治末から大正期の俵による日本刀の研究がある（著書としての出版は昭和28年）。これは光学顕微鏡や化学分析が主な研究手法で、小札の分析も行っている¹⁾が、古典的研究である。その後も、たたら製鉄²⁾や日本刀の組織など個別に研究されたが³⁾、火縄銃や鎧を含めた日本刀、海外刀などを透過電子顕微鏡などの先端的な手法で総合的に行った研究としては、北田⁴⁾による研究が先行するものとして特筆される。また、甲冑は日本刀より注目度が低いため、材料科学的研究は少ない。ここでは著者（北田）が所蔵する鎧部品の幾つかについて観察した金属組織などを中心に述べる。

2 甲冑鋼板の金属組織

2.1 草摺

小札の多くは幅2～4cm、長さ5～7cm、厚さ1mm程度の長方形鋼板に孔をあけ、ここに糸（緋）、革あるいは鋼線で繋ぎ、平面寸法を大きくする。単位となる鋼板の大きさは使われる鎧や場所によって異なる。平板が多いが、湾曲した鋼板も多く使われた。用いた試料は図2で示す鋼板を繋ぎ合わせた草摺で、腰から大腿部を守るための鎧である。試料の形式は室町時代から江戸時代にかけて作られた当世具足に分類される。

試料の草摺は横に7枚、縦に6枚の鋼板を鋼線で繋ぎ合わせたものである。(b)の小札の拡大像のように、当初は錆止めと美しく見せるために黒漆が塗られていたが、図の中央部の漆が剥げて、地の鋼板の表面が露出している。繋の孔は18個で、四隅の穴は他より大きく、2つの鋼線鎖を通せるようになっている。

草摺鋼板の代表的な光学顕微鏡像を図3に示す。断面像では、上部に中炭素鋼の層があり、下部は低炭素鋼のフェライ

ト組織の層である。上部の表面近傍は脱炭した形跡がある。この鋼板が意図的に炭素濃度の異なる素材を鍛接したものか、あるいは炭素濃度が不均一な素材を使い铸造したか不明であるが、江戸時代の榊原香山著の「中古甲冑製作辨」⁵⁾では、鎧鋼板の製作方法について「硬い鋼を表側に、軟らかい生鉄を裏側に合わせて作る」と述べているので、この鋼板のような組織構造と思われる。

図3の鋼板のマイクロビッカース硬度の分布を図4に示す。硬度分布では、炭素濃度の高い図3の上部領域で硬度が高く、低炭素鋼の下部領域では硬度が低くなっており、ほぼ金属組織に一致する。たたらで作られた低炭素鋼のマイクロビッカース硬度は90-110程度であり⁴⁾、低炭素鋼は加工硬化している。一方、草摺鋼板の金属組織は観察する鋼板により異なり、試料全体が低炭素鋼や高炭素鋼からなる試料なども僅かに見られる。

2.2 袖

袖は上腕から手首あるいは手の甲までを守る鎧である。用いた試料を図5に示す。この鎧に使われている小札は数種の形状

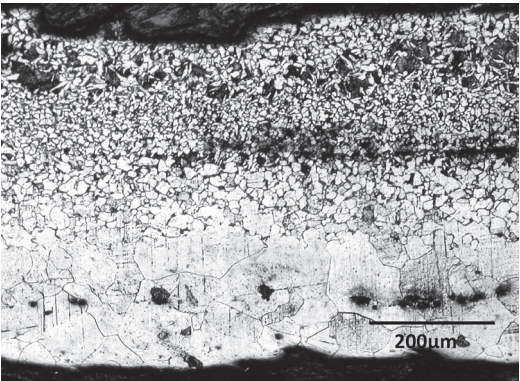


図3 草摺鋼板の代表的な断面光学顕微鏡組織

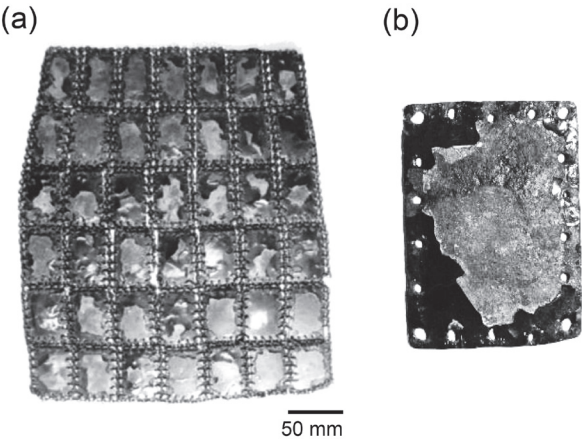


図2 草摺試料（北田蔵）と小札の拡大像

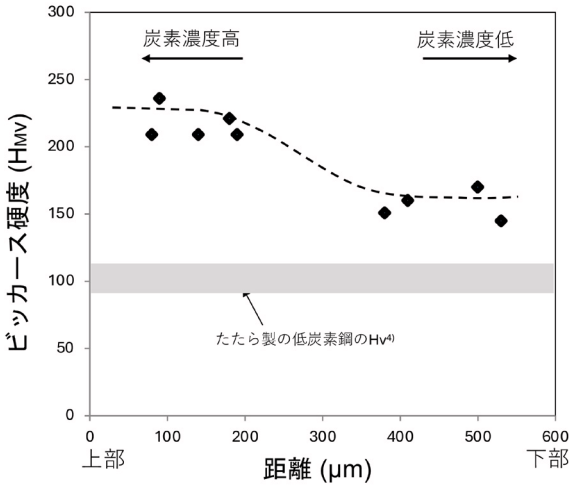


図4 図3の鋼板の硬度分布

からなり、鎧の上端(図左側)から手の甲に向かってAからIの記号でこれらの鋼板を示す。Aは平板、Bは上面が四角錐状、Cは鑿(たがね)で紋様を付けたドーム状の板、Dは鋼線の鎖帷子状で肘の動きに合わせ、Eは前腕上部のドーム状平板、Fは断面が山形の細長い前腕を包む鋼板、Gは手首と甲を繋げる鎖帷子、Hは手の甲を被う半円上の鋼板、Iは指、Jは親指を被う形にした鋼板である。これらの鋼板部品は鎖によって繋がれており、肘と手首の部分は自由に動かせるように、鎖帷子状になっている。裏には厚手の木綿布が縫い込まれている。この鎧は様々な形状の鋼板を用いて比較的密に作られている上等なものである。

図6に図5のAで示した鋼板の代表的な断面光学顕微鏡像を示す。上部の中炭素鋼とみなされる層の厚さは約200 μm で、低炭素鋼Aで示す中央の層は約500 μm で非金属介在物が少なく、低炭素鋼Bで示す下部の層は約250 μm で非金属介在物が多い。これらは断面全体にわたってほぼ均一な層構造となっている。鋼板に鍛造する前の素材がこのような構造になっていて、そのまま薄くされたものとみなされる。ただし、断面上部の表面近傍は炭素濃度が低くなっており、焼鈍で脱炭したことが考えられる。

浸炭によって表面の炭素濃度を高くしたものであれば、断面の上下側に炭素濃度の高い層が出来るので、浸炭によるものではない。たたら製鉄法で製造した素材では、炭素濃度のばらつきがあり、それが加工されたものとも考えることも出来るが、日本刀と同様に、当時の技術としては、炭素濃度の高い鋼と低炭素鋼を鍛接することは容易である。ここで示した袖鋼板は2種の炭素鋼を鍛接したのを使ったとみられ、鋼板としても上質な作りと言える。一方、前述の草摺では、2層の鋼板の例を示したが、中には1層からなる鋼板もあり、観察部位によるばらつきが大きい。鉄鋼の再利用は古くから行われており、上等ではない鎧には再生した鋼が使われた可能性があり、その場合には、不均質な素材をそのまま鍛造したような炭素濃度などのばらつきが大きい鋼板が含まれる。

断面上部の組織の詳細を知るために、電子後方散乱回折(EBSD)法によって観察した。これを図7に示す。図の右側が表面近傍で、左が内部の向きである。表面近傍の約200 μm

までは結晶粒径が小さく、約200 μm 以上の深さになると、ほぼ均一な結晶粒径になる。この領域は炭素濃度の高い領域であり、この素材自体の結晶粒径が小さかったことと、鋼板を薄くする工程で何度か焼鈍されていると思われるので、加工と再結晶の過程で結晶粒が微細化したとも考えられる。

上述の鋼板には非常に多くの非金属介在物が含まれている。これは日本のたたら製鉄で作られた鉄鋼だけではなく、紀元前から近世までの西欧や東南アジアの鉄鋼にも非金属介在物が多く含まれている⁴⁾。一方、15世紀に高炉が発明されてからは、非金属介在物量は次第に低くなった。

たたら鉄鋼中に多量の非金属介在物が含まれているにも関わらず、展延性は非常に良く、非金属介在物の破壊から生ずる亀裂などは発生していない。これは、後述のように(図14)、フェライトの純度が非常に高く展延性に優れるので、非金属介在物から発生する亀裂を伝播させないためである。図8に袖鋼板の代表的な荷重-伸び曲線を示す。組織が複雑であるので、詳細な変形挙動は不明であるが、引張強度は330Mpa程度である。

2.3 兜

兜は上級武士の被る防具で、前述のように、兵卒は山形の陣笠を用いた。兜は頭を入れる鉢と頸部を守る鍔(しころ)、

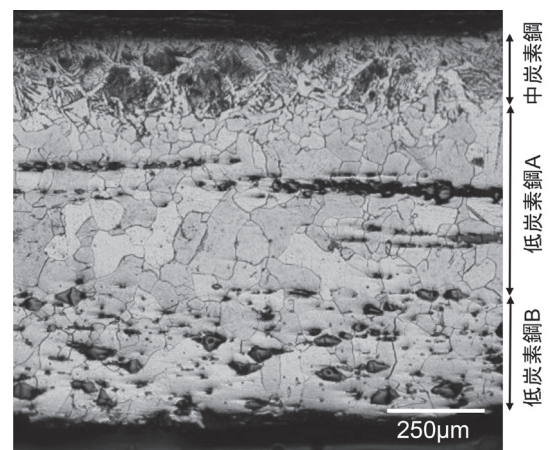


図6 袖鋼板の代表的な断面光学顕微鏡像⁴⁾

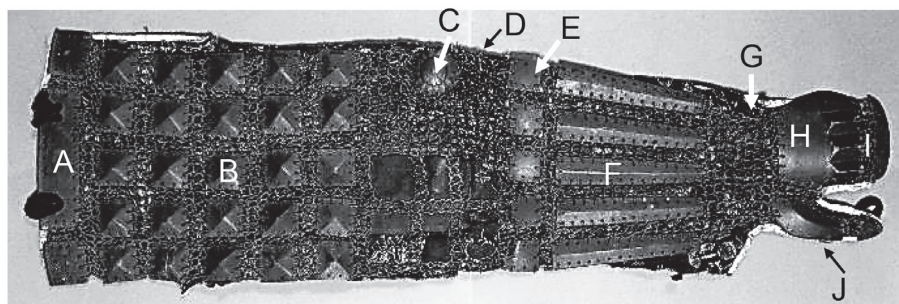


図5 袖試料(北田蔵)

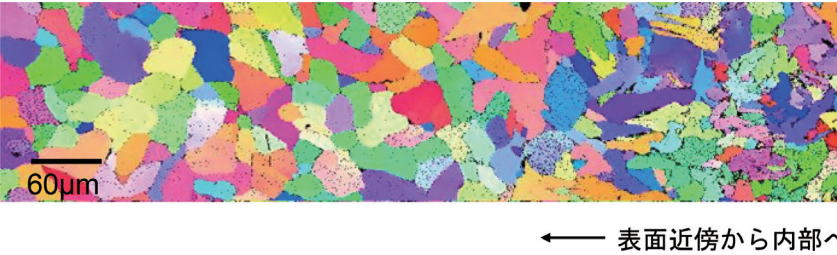


図7 図6の鋼板表面から内部への結晶粒分布 (EBSDによる)⁴⁾

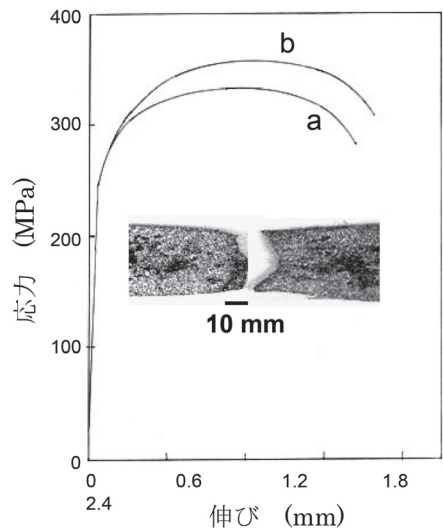


図8 袖鋼板の代表的な荷重-伸び曲線⁴⁾



図9 兜試料 (北田蔵)

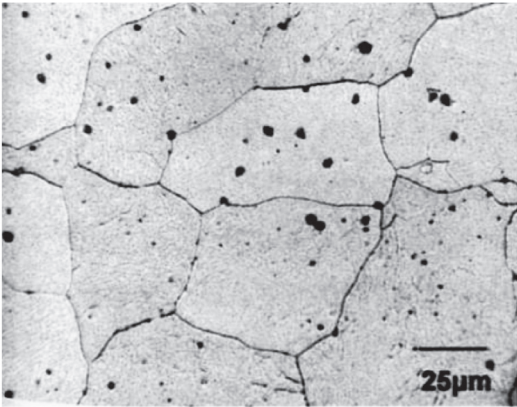


図10 兜鋼板の代表的な光学顕微鏡像⁴⁾

底、飾りなどからなる。鉢の形は多様で、大別すると現代の鉄兜と同様なドーム形と、多くの鋼板を剥ぎ合わせて突起をつけた筋兜がある。分析に用いた兜は図9で示すもので、鉢は7枚の鋼板を合わせ、鍔、底などが付いている。前面には鍔形と呼ばれる飾りを差しこむ孔がある。

図10に鉢部鋼板の板面に平行な光学顕微鏡像を示す。非金属介在物が小さく、密度も低い低炭素鋼で、結晶粒径は50～150μmである。前述の鋼板と比較しても、当時としては非金属介在物の少ない鋼である。兜は上級武士の使用するものであり、良質の鋼が使われている。これは比較的軟らかい鋼であるが、刀や槍の防御には十分である。ただし、弾丸の防御性については不明であるが、円形の場合、弾丸が鋼板面に垂直に入射しないと貫通しにくいので、形状的には弾丸の防御に適している。

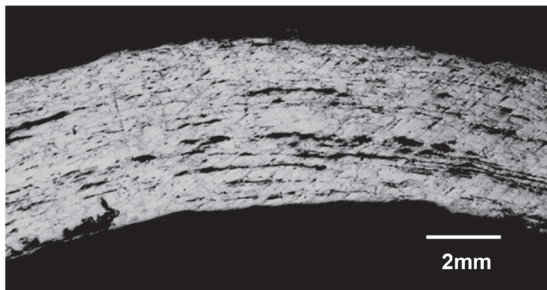
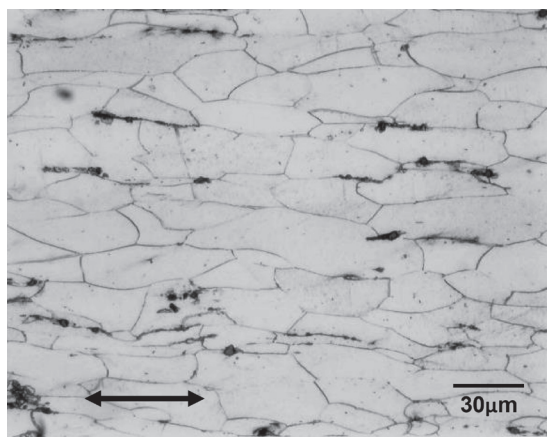
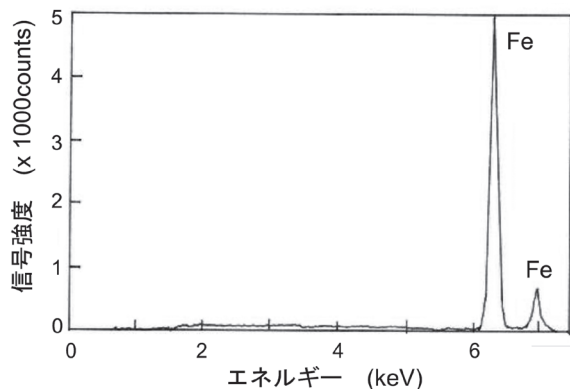
3 鎖鋼線の金属組織

鎧には鋼線製の鎖が不可欠であり、前述の鎧には全て鎖が使われている。また、鎖のみを繋いでできる鎧もあり、衣服のように着る形式を鎖帷子という。日本では鎧より簡単で動きやすい防具として使われ、鎧の下に着ることもあった。鎖

の繋ぎ方には幾つかあり、主に円形と楕円形の組み合わせで、一重鎖、二重鎖、総鎖などがある。

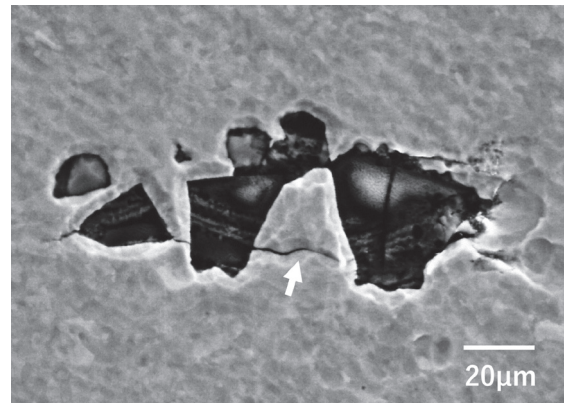
円形に加工された鎖鋼線断面のマクロ像を図11に示す。非金属介在物が同心円状に配列しており、パーライトなどは観察されない低炭素鋼である。図12は鋼線断面の光学顕微鏡像で、図中、鋼線の長手方向を両矢印で示す。結晶粒は鋼線の長手方向に細長くなっており、これは引き抜き加工による変形のためである。鋼線のフェライト地のエネルギー分散X線分光では、図13で示すようにFe以外の不純物が検出されない高純度のフェライトあるいは純鉄に近いものである。鋼線の引張強度は500MPa程度、マイクロビッカース硬度は230前後である。断面の硬度は鋼線の表面近傍で高くなっている。

鋼線の製造にあたっては、焼鈍を繰り返して次第に細くす

図11 鎖鋼線の断面マクロ像⁴⁾図12 鎖鋼線の代表的な断面光学顕微鏡像⁴⁾
(両矢印が線の長手方向)図13 フェライト地のエネルギー分散X線分光像⁴⁾

る。これは、現代の引き抜きと原理は同じである。江戸時代の「先大津阿川村山砂鉄洗取之図」⁶⁾には「ハリ鋳を作る図」があり、丸太に鋼線を止めて回転させ、穴のある治具を通して冷間で引き抜く様子が描かれている。また、「鍼金職業并諸道具之図」(深井家文書「国郡志御編集二付書上帳 山県郡新庄村」)⁷⁾にも江戸時代の線引き作業風景が示されており、そこには「なまし場」が描かれている。

前述のように、たたら鉄の場合、非金属介在物が多くみられるが鋼線の加工性は良好である。図14は鋼線で観察された、破壊された非金属介在物の走査電子顕微鏡像である。一つの非

図14 加工によって破壊された鋼線中の非金属介在物⁴⁾

金属介在物が割れて4個に分かれている。非金属介在物が割れて生じた間隙をフェライトが充填した状態になっている。矢印で示す線は左から右へと繋がっているのも、介在物が割れたときに生じたフェライトの亀裂によるゴーストラインと思われるが、線引き加工と焼鈍の過程でほぼ接着されている。このように、非金属介在物は鋼線の加工性をあまり損なっていない。

4 まとめ

以上、甲冑の要となる鋼板・鋼線について材料科学的に分析した結果を概観した。鎧や兜の鋼板の金属組織および炭素濃度は、観察する鋼板により異なる。比較的均一な金属組織からなるものや異なる金属組織からなるもの、また非金属介在物の多いものなどが見られ、甲冑の部位や鋼板により、品質の違いもある。一方、鎖鋼線には低炭素鋼が用いられ、線引きによる加工組織が観察された。たたら製鉄による鋼には非金属介在物が多く観察されるが、それによって加工性が損なわれることはなく線引きが行える。いずれの鋼も現代鋼とは性質が大きく異なる。

参考文献

- 1) 俵国一：日本刀の科学的研究，日立評論社，(1953)，428.
- 2) 永田和宏：たたら製鉄の技術論：日本古来の鉄作りが現代によみがえる，アグネ技術センター，(2021).
- 3) 齋藤努，高塚秀治，宇田川武久：国立歴史民俗博物館研究報告，136 (2007)，237.
- 4) 北田正弘：日本刀の材料科学，雄山閣，(2017).
- 5) 榊原香山：中古甲冑製作辨，須原屋茂兵衛，(1801).
- 6) JFE21世紀財団：たたら：日本古来の製鉄増補改訂版，JFE21世紀財団，(2017)，30，46.
- 7) 深井家文書，江戸時代後期，広島県立文書館.

(2024年4月22日受付)